

Az X-sugár

Röntgensugárzás

Előállítás, tulajdonságok

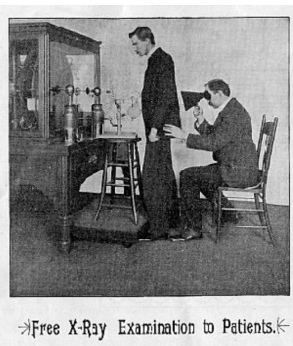
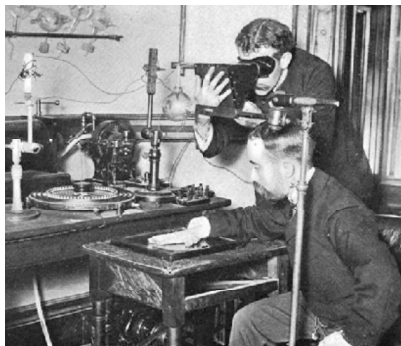


Wilhelm Konrad
Röntgen
(1845-1923)
Nobel-díj, 1901



Hand mit Ringen ("Kéz gyűrűvel"):
Wilhelm Röntgen első "orvosi" röntgenfelvétele
felesége kezéről (1895 december 22).

Papírtölcsér radioszkóp



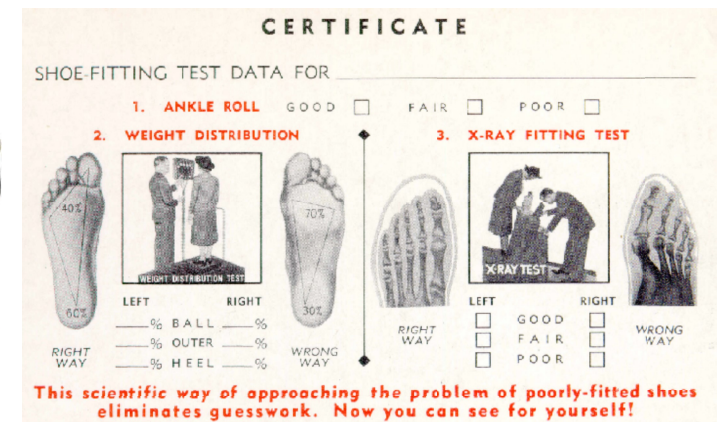
Free X-Ray Examination to Patients.



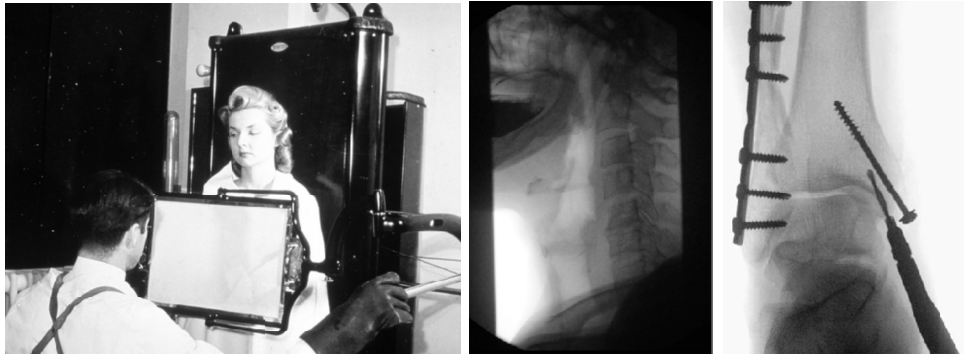
1890-es évek vége

I. világháború

Cipész fluoroszkóp (1930-50)



Orvosi röntgenfelvétel

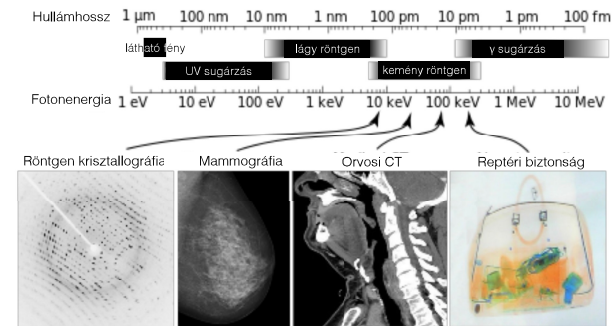


1940

1950

ma

A röntgensugárzás: elektromágneses sugárzás



Hullámhossz 10 - 0.01 nm, **Frekvencia** 30×10^{15} - 30×10^{18} Hz, **Energia** 120 eV - 120 keV, (petahertz - exahertz)

Röntgensugárzás

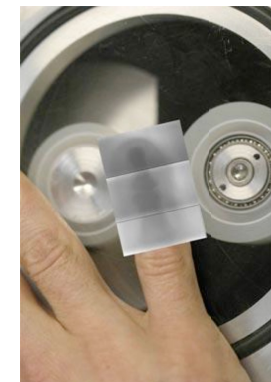
- A röntgensugárzás keltése
- Spektrális tulajdonságok
- A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 1: diffrakció
- A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 2: abszorpció

A röntgensugárzás (nem szokványos) keltése

Tribolumineszcencia: dörzsöléssel kiváltott fényemisszió. Francis Bacon, 1605.

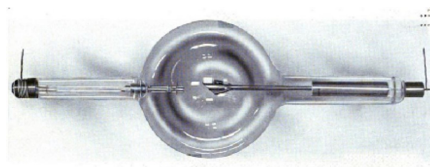
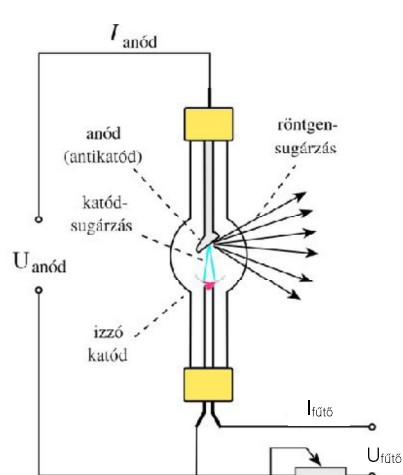


Ragasztószalag lehántásakor látható fotonok...



...és röntgenfotonok emittálódnak. (Nature News, October 2008)

Röntgensugárzás keltése - gyakorlat



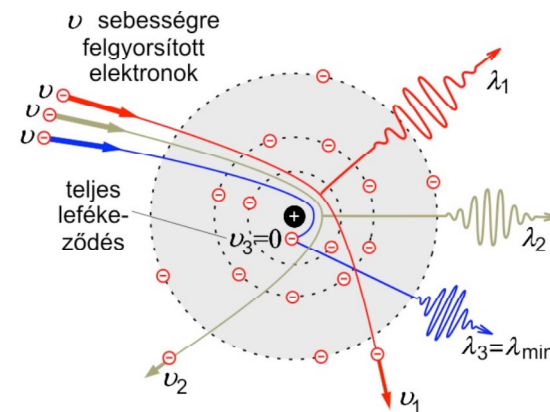
Röntgenső (Coolidge, 1900-as évek eleje).



Forgóanódos röntgenső (anód forgás hűtés végett)

Fékezési röntgensugárzás

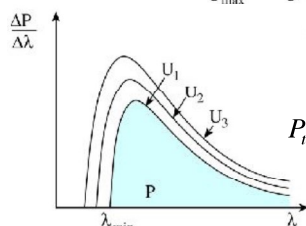
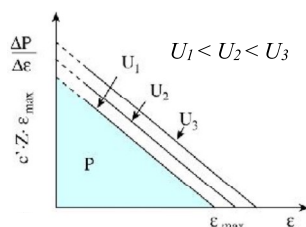
A felgyorsított elektronok lelassulnak ("lefékeződnek") — és ezért mozgási energiát veszítenek — az anód atomjainak elektromos terében



"Bremsstrahlung"

A fékezési röntgensugárzás spektruma

Folytonos spektrum



Maximális fotonenergia (ϵ_{\max})
 N.B.: Elektron teljes mozgási energiája egy lépésben alakul át (ritka esemény).
 $eU_{\text{anód}} = \epsilon_{\max} = hf_{\max}$
 e : elektron töltése;
 $U_{\text{anód}}$: gyorsítófeszültség;
 $eU_{\text{anód}}$: gyorsítási munka
 h : Planck állandó;
 f_{\max} : határfrekvencia

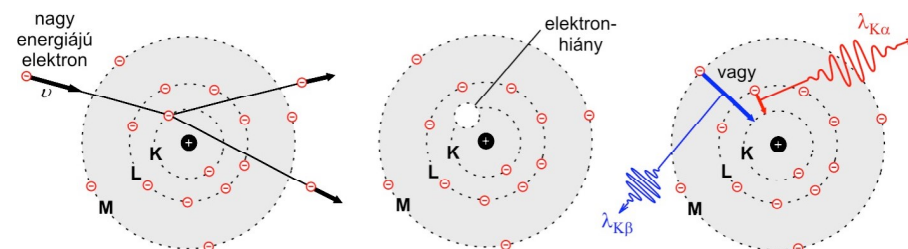
Határhullámhossz (λ_{\min})
 (Duane-Hunt-törvény)
 $\lambda_{\min} = \frac{hc}{e \cdot U_{\text{anód}}}$
 N.B.: A határhullámhossz a gyorsítófeszültséggel fordítottan arányos
 c : fénysebesség;
 hc/e : konstans (1.2398 kV·nm)

Energiaspektrum
 (teljesítmény energia-függése)

Összteljesítmény (P_{tot})
 (háromszög területe alapján)
 $P_{\text{tot}} = \frac{1}{2} c \cdot Z \cdot \epsilon_{\max}^2 = c \cdot Z \cdot U_{\text{anód}}^2 \cdot e^2$
 C_{Rtg} : arányossági tényező ($1.1 \times 10^{-9} \text{ V}^{-1}$);
 $I_{\text{anód}}$: anódáram (időegység alatt anódra csapódó elektronok száma);
 Z : anód anyagának rendszáma

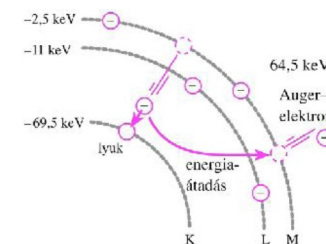
Hatásfok (η)
 $\eta = \frac{P_{\text{tot}}}{P_{\text{in}}} = \frac{C_{\text{Rtg}} \cdot I_{\text{anód}} \cdot U_{\text{anód}}^2 \cdot Z}{I_{\text{anód}} \cdot U_{\text{anód}}} = C_{\text{Rtg}} \cdot U_{\text{anód}} \cdot Z$
 P_{in} : befektetett teljesítmény
 N.B.: Típusosan $\eta < 1\%$.

Karakterisztikus röntgensugárzás

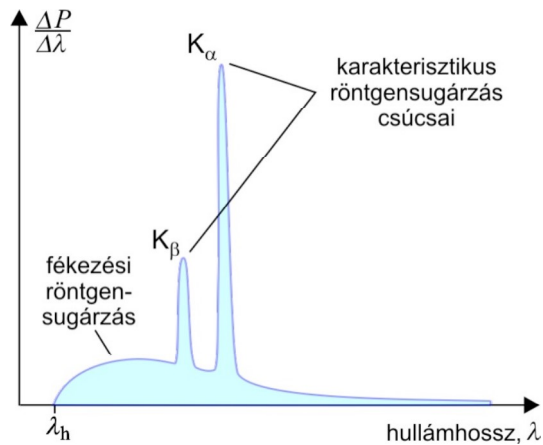


A belső pályáról kilökött elektron nagyenergiájú pályáról pótlódik

Elektronátmenet energiája külső héj elektron kiszabadulására fordítható: Auger elektron



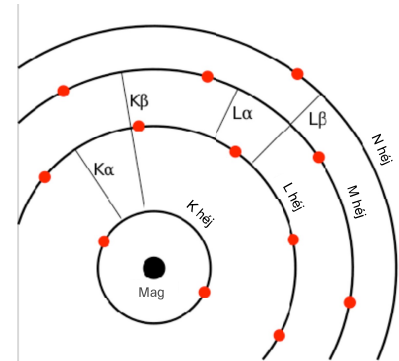
Karakterisztikus röntgensugárzás spektruma



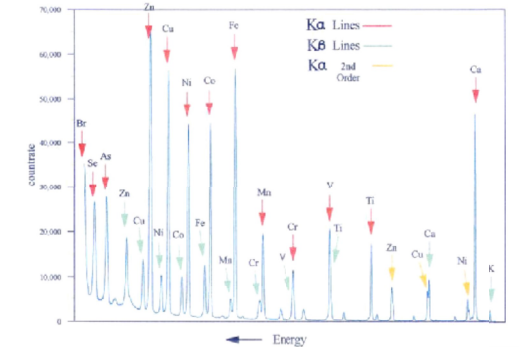
Vonalas spektrum

A röntgen spektrum az elemi összetételt jellemzi

Mivel a belső pálya-elektronok vesznek része a jelenség létrejöttében, a spektrum az elemi (és nem molekuláris) tulajdonságokat jellemzi

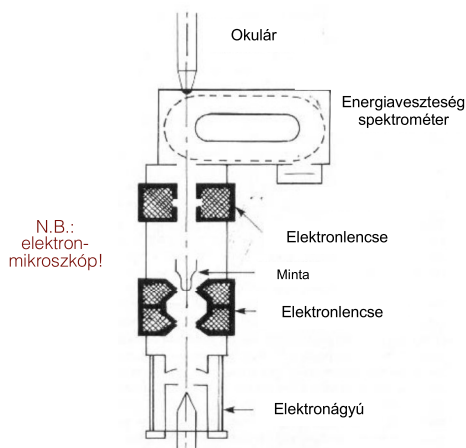


Elektron átmenetek Ca atomban

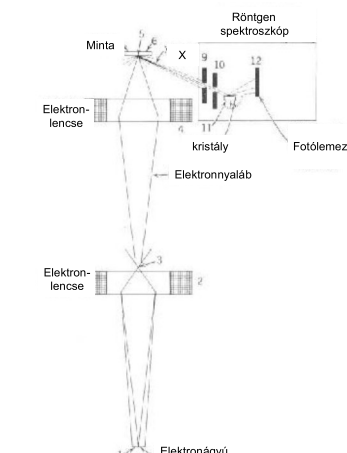


Energiadiszperzív röntgen fluoreszcencia spektrum

Karakterisztikus röntgensugárzás detektálása

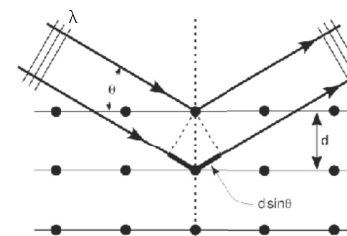


Elektron próba mikroanalizátor (energiavesztés mérése)

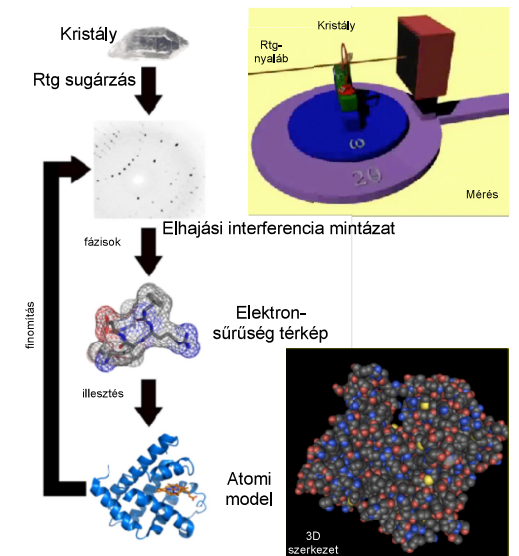
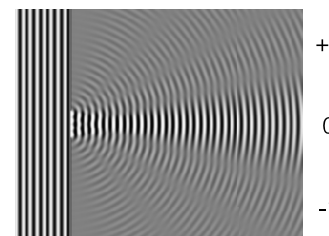


Röntgen spektroszkóp (Rtg energiaspektrum mérése)

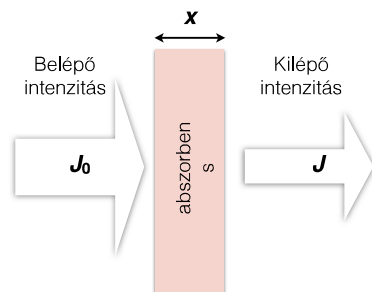
A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 1: Diffrakció



$$2d \sin \theta = n\lambda$$



A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 2: Abszorpció



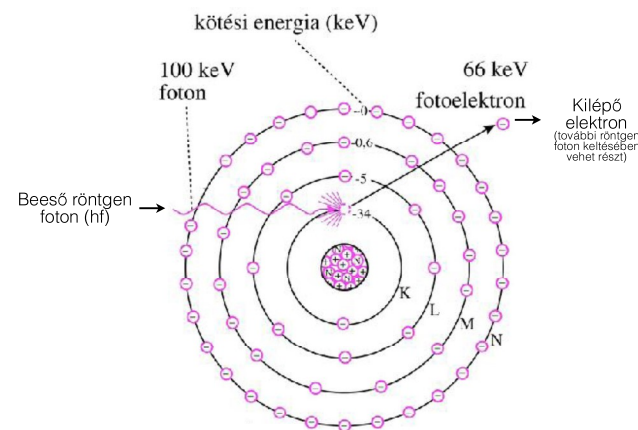
Exponenciális
sugárgyengítési törvény

$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu = \mu_m \rho$$

μ = gyengítési együttható
 μ_m = tömeggyengítési együttható (cm²/g)
 ρ = sűrűség (g/cm³)

Kölcsönhatás mechanizmus I: Röntgen fotoeffektus



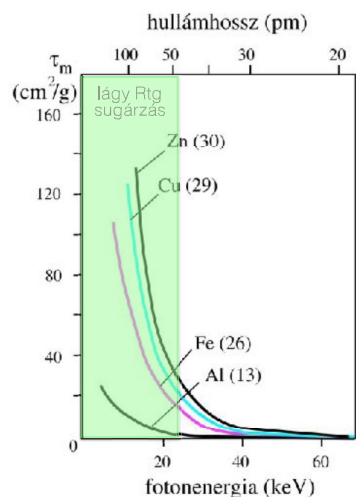
A diagnosztikai
röntgenben fellépő
legfontosabb hatás

Fotoeffektus gyengítési
együttható:

$$\tau = \tau_m \rho$$

τ_m = fotoeffektus
tömeggyengítési
együttható
 ρ = sűrűség

A fotoeffektus függ a fotonenergiától és a rendszámtól



$$\tau_m = \text{const} \cdot \frac{Z^3}{\epsilon^3} = C \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$$

$$C = 5,5-6,5 \text{ cm}^2/\text{g nm}^3$$

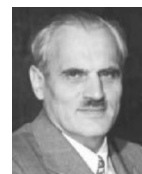
Többkomponensű rendszerben:
"effektív rendszám" (Z_{eff})

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n w_i Z_i^3}$$

ϵ = fotonenergia
 Z = rendszám
 w = móltört
 n = komponensek száma

Közeg	Z_{eff}
Levegő	7.3
Víz	7.7
Lágy szövet	7.4
Csontszövet	13.8

Kölcsönhatás mechanizmus II: Compton szórás



Arthur Holly
Compton
(1892-1962)

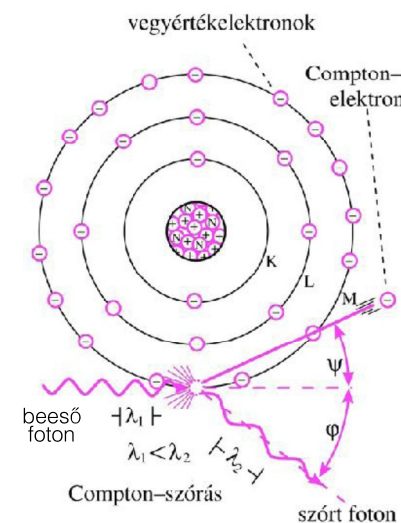
Energiamérleg:

$$hf = A + hf_{\text{scatt}} + E_{\text{kin}}$$

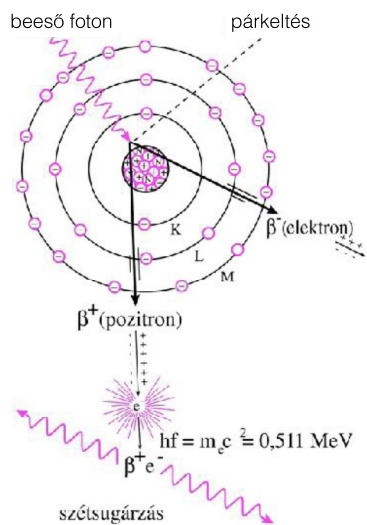
A = kötési energia
 hf_{scatt} = szórt foton energiája
 E_{kin} = Compton-elektron mozgási energiája

Compton-effektus
gyengítési együttható:

$$\sigma = \sigma_m \rho$$



Kölcsönhatás mechanizmus III: Párkeltés



(csak a terápiás röntgensugárzás esetében releváns)

Energiamérleg:

$$hf = 2m_e c^2 + 2E_{kin}$$

m_e =elektron tömege
 c =fénysebesség

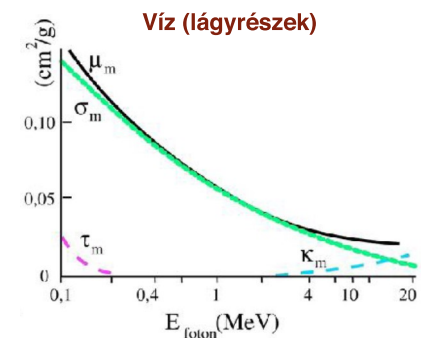
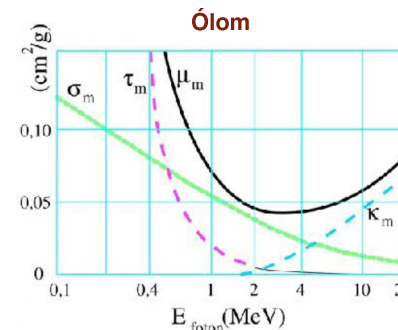
Párkeltés gyengítési együttható:

$$\kappa = \kappa_m \rho$$

A párkeltés a nagyenergiájú (terápiás) röntgensugárzás és a γ -sugárzás esetében jelentős.

Sugárgyengítési mechanizmusok

Fotonenergia és közeg hatása



$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

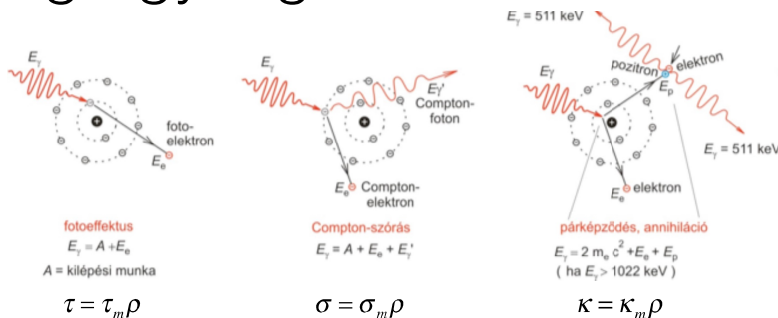
μ_m =tömeggyengítési együttható

σ_m =Compton-szórás tömeggyengítési együttható

τ_m =fotoeffektus tömeggyengítési együttható

κ_m =párkeltés tömeggyengítési együttható

A sugárgyengítés mechanizmusai



$$\tau = \tau_m \rho$$

$$\sigma = \sigma_m \rho$$

$$\kappa = \kappa_m \rho$$

$\tau_m, \sigma_m, \kappa_m$: tömeggyengítési együtthatók, ρ : sűrűség

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$$

Mechanizmus	Tömeggyengítési együttható fotonenergia (ϵ)-függése	Tömeggyengítési együttható rendszám (Z)-függése	Releváns ϵ tartomány lágyszövetben
Fotoeffektus	$\sim 1/\epsilon^3$	$\sim Z^3$	10 - 30 keV
Compton-szórás	ϵ növelésével lassan csökken	$\sim Z/A$ (A = tömegszám)	30 keV - 20 MeV
Párkeltés	ϵ növelésével lassan nő	$\sim Z^2$	> 20 MeV

Diagnosztikai röntgen:

1. lágyszövet és csont közötti kontrasztmechanizmus: fotoeffektus ($\sim Z^3$)
2. lágyszöveten belüli kontrasztmechanizmus: Compton-szórás ($\sim \rho$)